

包层模谐振特种光纤及传感特性研究

王廷云 庞拂飞 陈振宜 曾祥龙 陈娜

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建国家重点实验室培育基地, 上海 200072)

摘要 研究了一种具有双包层结构的包层模谐振特种光纤,该特种光纤具有一个低折射率内包层,基于耦合模原理,纤芯模与包层模之间发生谐振耦合,从而获得具有带阻特性的传输光谱。系统介绍了包层模谐振光纤的制备、传输原理及其弯曲、溶液折射率、折射率/温度双参量等传感特性。实验和理论研究结果表明,包层模谐振特种光纤对于弯曲、溶液折射率参量具有良好的敏感性,此外,通过内包层掺杂可以调节包层模谐振光谱的温度敏感特性。

关键词 光纤传感器;包层模谐振;双包层光纤;弯曲;折射率;温度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900140

Research on Cladding Mode Resonant Specialty Optical Fibers and Their Sensing Properties

Wang Tingyun Pang Fufei Chen Zhenyi Zeng Xianglong Chen Na

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai, 200072, China)

Abstract A cladding mode resonant specialty optical fiber comprising a double cladding structure is proposed. The specific fiber has a thin and low refractive index inner cladding. Based on the coupled mode theory, a core mode can be resonantly coupled to a cladding mode, and then a band-reject spectrum can be obtained. We mainly introduce the fabrication technology, operation principle of the specific fiber and demonstrate its sensor applications in bend, solution refractive index (RI) and RI/temperature dual parameters. As the theoretical and experimental results show, the specific fiber is sensitive to the parameters of bend and solution RI. Moreover, the temperature sensitivity of the specific fiber can be adjusted by different dopants in the inner cladding.

Key words fiber-optic sensor; cladding mode resonance; double cladding fiber; bend; refractive index; temperature

OCIS codes 060.2280; 060.2370; 060.2400; 060.2270

1 引言

光纤包层模激发与传输技术在光纤通信、光纤传感和光纤激光器领域具有非常广泛的应用。在光纤通信领域,光纤包层模可以实现掺铒光纤放大器增益平坦滤波器、可调光纤滤波器和光纤宽带耦合器等^[1~3];在光纤传感领域,基于包层模式耦合特性和包层模渐逝波场特性,光纤包层模可以用于实现弯曲、应变、温度、溶液折射率(RI)和生化等光纤传感器^[4~6];在光纤激光器领域,基于包层模的光波滤

波功能,可以实现多波长光纤激光器、高功率光纤激光器等^[7,8]。目前,激发光纤包层模的技术主要包括两类:1)基于普通单模光纤(SMF)微加工技术,如长周期光纤光栅、倾斜光栅和熔融拉锥光纤等^[9,10];2)采用特种光纤与单模光纤熔接技术,包括将多模光纤、光子晶体光纤和细芯径光纤等单模光纤熔接^[11~13]。这些技术都具有各自的优点和不足,采用微加工技术,可以实现对光纤包层模的有效、精确控制,但是其加工设备成本较高;采用熔接技术,

收稿日期: 2011-07-29; 收到修改稿日期: 2011-08-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60937003)、国家自然科学基金(60807031)和上海市科委“科技启明星”(10QA1402600)资助课题。

作者简介: 王廷云(1963—),男,博士,教授,主要从事特种光纤及光电检测等方面的研究。

E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn

具有制备工艺简单的特点,但是对于包层模的激发不能很好地控制;上海大学特种光纤与光接入网省部共建国家重点实验室培育基地提出了一种基于特种光纤的包层模激发技术^[14~20],这种光纤具有双包层结构,纤芯和外包层之间具有较薄的内包层,基于渐逝波耦合原理,纤芯中传输的光可以激发包层模,将光能量耦合至外包层中传输。由于包层模激发特性由光纤内包层结构决定,而且具有与普通单模光纤相同的纤芯,因此,包层模光纤可以实现包层模精确控制。由于包层模具有较大的模场和渐逝波场,因此,可以在弯曲、折射率等传感技术方面得到广泛应用。本文研究了一种具有双包层结构的包层模谐振特种光纤,介绍了包层模谐振特种光纤的制备、传输原理及其弯曲、溶液折射率、折射率/温度双参量等传感特性。

2 包层模谐振特种光纤原理

图 1(a) 为包层模谐振特种光纤折射率分布示意图^[14],它是由纤芯、内包层和外包层组成,其中纤芯的折射率与外包层相同,内包层折射率低于纤芯。为了分析包层模谐振特种光纤的模式激发原理,可以把其等效为纤芯波导和外包层波导的复合波导,如图 1(b) 所示。那么,纤芯中传输的光波就可以通过渐逝波耦合效应耦合至外包层光波导中传输。根据光纤耦合模理论可知,只有当两个相互耦合的光波导具有相等的传播常数时,才能够实现能量的有效耦合,由于包层模谐振特种光纤的纤芯和外包层具有不同的波导结构,因此,只有在特定波长处,纤芯模和包层模才具有相同的传播常数,即相位匹配,从而能够实现光波谐振耦合效应。

根据包层模谐振光纤波导结构,模拟了典型参数($n_{co} = n_{ocl} = 1.456, n_{icl} = 1.454, 2a = 9 \mu\text{m}, 2b = 27 \mu\text{m}, 2c = 125 \mu\text{m}$)条件下光纤的传播特性。图 2 为等效复合波导纤芯模和包层模的色散曲线^[14],其中 V 为归一化频率, B 为归一化传播常数,可以看出,在 P 点处,纤芯模基模 LP_{01} 与包层模 HE_{15} 的传播常数相等,即满足相位匹配条件。同时,计算了包层模谐振光纤传输光谱^[15],如图 3 所示。其传输光谱呈现阻带滤波特性,这说明在满足相位匹配条件的波长处,纤芯中的光波能量全部耦合至外包层传输。

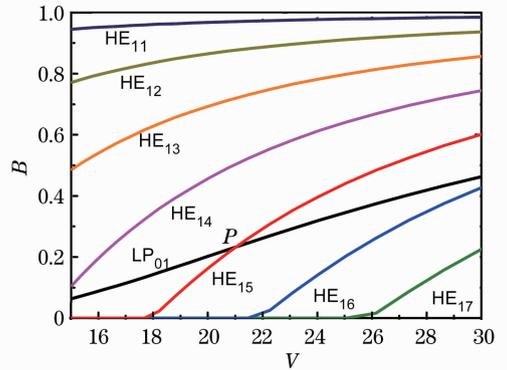


图 2 包层模谐振光纤归一化色散曲线

Fig. 2 Normalized dispersion curves of the cladding mode resonant fiber

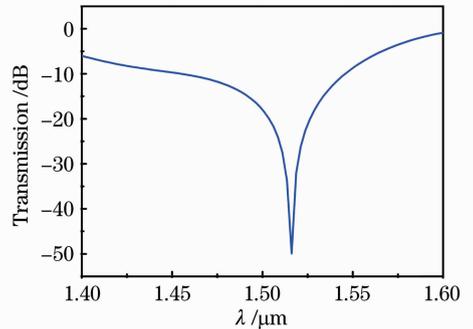


图 3 理论计算包层模谐振光纤传输光谱

Fig. 3 Theoretical transmission spectrum of the cladding mode resonant fiber

3 包层模谐振光纤制备及特性

包层模谐振光纤由纤芯、内包层和外包层组成,其中内包层的折射率低于纤芯和外包层的折射率。为此,基于改进化学气相沉积(MCVD)技术,利用实验室的制棒机和拉丝机制备了包层模谐振光纤。内包层分别采用两种材料掺杂:掺氟和掺硼。掺氟二氧化硅具有较低的温敏性,掺硼二氧化硅具有较高温敏性,因此,可以在不同应用中进行优化选择。掺

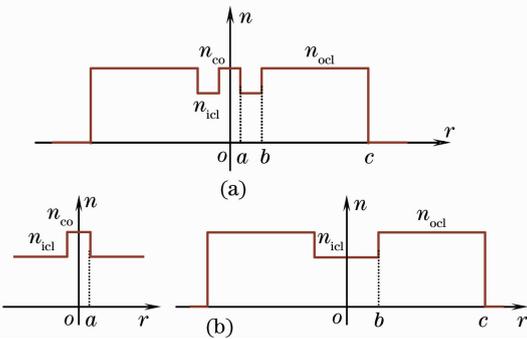


图 1 (a)包层模谐振特种光纤折射率分布示意图;
(b)等效后的芯波导和包层波导

Fig. 1 (a) Schematic refractive index profile of the cladding mode resonant specific fiber; (b) equivalent core and cladding waveguides

氟内包层的特种光纤制备工艺如下^[15]：1)用高纯度的石英管(外径 20 mm,厚度 2 mm)作为基管,通入氧、氟利昂和硅烷等原料,在高温条件下反应生成掺氟二氧化硅,沉积于基管内壁,获得掺氟内包层;2)通入氧和硅烷反应来沉积纯硅纤芯,反应温度为 1500 ℃;3)在 2000 ℃左右将石英管塌缩形成预制棒;4)将预制棒放在拉丝塔上进行拉丝,温度为 1800 ℃。掺硼内包层特种光纤的制作工艺与上述工艺类似。

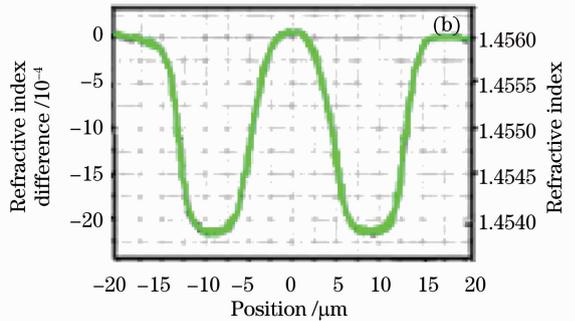
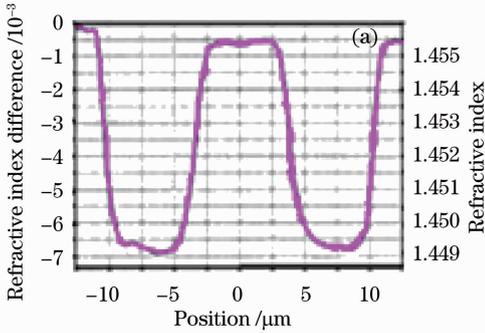


图 4 光纤折射率分布。(a)掺硼光纤;(b)掺氟光纤

Fig. 4 Refractive index profile of the specific fibers. (a) B-doped fiber; (b) F-doped fiber

4 包层模谐振特种光纤传感特性

与常规单模光纤的纤芯模式相比,光纤包层模具有更大的模场分布,这将使得包层模对光纤弯曲具有敏感性;另外,光纤包层模有渐逝波渗透到周围环境中,由此,它将对周围介质的折射率变化具有敏感性。本课题组所研制的包层模谐振光纤将在弯曲、折射率传感领域具有广泛应用前景。

4.1 包层模谐振光纤弯曲传感特性

结构弯曲是一个非常重要的物理量,在结构监控检测、智能结构等方面具有广泛的应用,利用弯曲可以间接测量其他一些物理量,如微位移、压力、液压和加速度等。因此,弯曲物理量的测量在生产生活中具有非常重大的意义。

利用包层模谐振光纤研究了一种弯曲传感器^[17,18],其传感原理为当包层模谐振光纤发生弯曲时,根据弹光效应原理,其折射率分布将发生变化,光纤中光波传输的模式特性也必然发生变化,纤芯模和包层模的色散曲线均会发生移动,两条色散曲线相交所获得的相位匹配点也发生变化,由此,通过测量谐振波长的漂移量即可测量弯曲的程度。

为了方便探测包层模谐振光谱,设计并制备了“单模-包层模-单模”结构传感头,采用简支梁实验装置改变传感光纤的弯曲半径,包层模光纤接入长

包层模谐振特种光纤拉制完成后,用光纤折射率分析仪(EXFO NR9200)对其折射率分布进行测试,测试结果如图 4 所示^[16]。掺氟光纤纤芯和内包层直径约为 9.3 和 26 μm ,纤芯与内包层折射率差约为 0.2%;掺硼光纤纤芯和内包层直径约为 6.3 和 17.7 μm ,纤芯和内包层折射率差约为 0.7%。两种光纤的外径均为 125 μm ,保证了他们与普通单模光纤之间容易进行熔接。

度为 13.99 mm。

测试了不同曲率条件下,谐振光谱的变化情况,从图 5 中可以看出,随着特种光纤曲率的增大(从 0 增加到 1.48 m^{-1}),谐振光谱向短波方向移动,谐振波长移动量与曲率变化具有较好的线性关系(图 6),灵敏度达 $-10.15 \text{ nm}\cdot\text{m}$ 。谐振波长向短波方向漂移是由于弯曲改变了纤芯模和包层模的相位匹配状态。弯曲光纤的模场向凸面移动,由于凸面部分的有效折射率大于凹面部分的有效折射率,光场向折射率高的部分集中,因此,弯曲后纤芯基模和各阶包层模的有效折射率大于笔直光纤。根据色散曲线(图 2)可知,当弯曲曲率增加时谐振波长向短波方

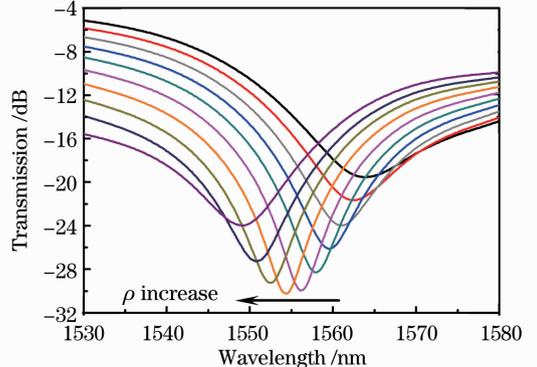


图 5 随着曲率 ρ 的增加谐振光谱的变化情况

Fig. 5 Resonant spectra under increasing ρ

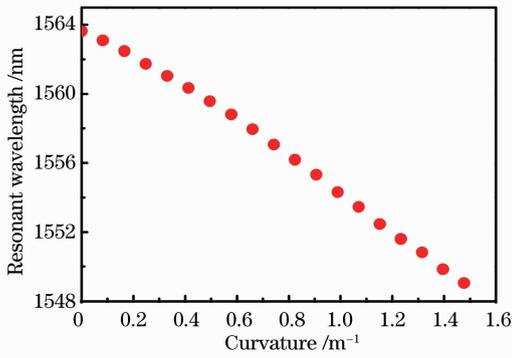


图 6 谐振波长与光纤曲率之间的变化关系

Fig. 6 Relation between the resonant wavelength and curvature

向移动。

4.2 包层模谐振光纤溶液折射率传感特性

光纤包层模在外界具有消逝波场,能够感知外界溶液折射率的变化,可以应用于生物化学等传感器。

基于包层模谐振光纤,研究了溶液折射率的传感特性^[14]。采用“单模-包层模-单模”光纤传感头,以不同浓度的蔗糖溶液作为待测溶液,折射率变化范围为 1.3333~1.4525。实验结果如图 7 所示(彩图请见网络电子版),当折射率增加时,包层模光纤的传输光谱向长波长方向移动。谐振波长随折射率的增加呈指数上升的趋势(图 8)。当外界溶液折射率靠近外包层折射率时,传感灵敏度逐渐上升,在溶液折射率为 1.45 附近,传感灵敏度达到 4135 nm/RIU(RIU 表示折射率单位)。

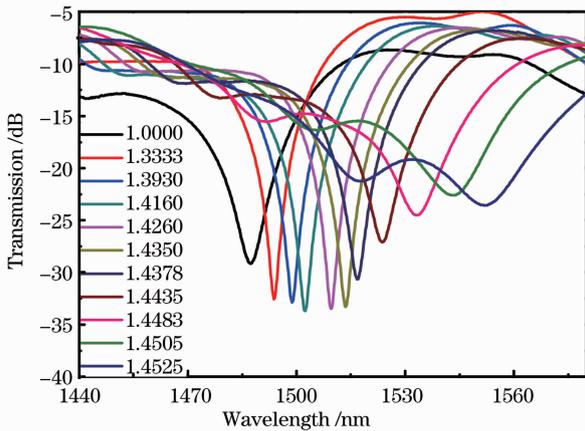


图 7 谐振光谱的溶液折射率传感响应特性

Fig. 7 Solution RI sensing response of the cladding-mode resonant spectra

基于耦合模理论分析可知,该谐振光谱是由纤芯基模和第五阶包层模耦合所得。然而,与常规的长周期光纤光栅五阶包层模的折射率传感特性相比^[21],包层模谐振光纤具有更高的灵敏度,在折射

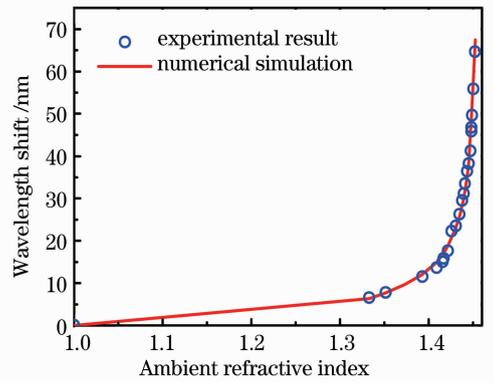


图 8 谐振光谱的溶液折射率传感响应特性

Fig. 8 Solution RI sensing response of the cladding-mode resonant wavelength

率范围 1.0000~1.4525 内,谐振波长移动总量达 65 nm。这一结果可以基于包层模光纤的包层模特性进行解释。由于被激发包层模的有效折射率必须大于光纤内包层折射率,而该光纤的内包层折射率只略低于纤芯和外包层,因此,只能有若干个包层模被激发。由图 2 给出的纤芯基模和各阶包层模式的波导色散曲线可以看出,被激发的 HE₁₅ 处于近截止区($B < 0.3$),相对于远截止区域($B \rightarrow 1$),在近截止区域,包层模色散曲线具有更大的斜率。当外界折射率变化时,包层模色散曲线将发生移动(图 9),在近截止区域将获得更高的传感灵敏度。常规的长周期光纤光栅,由于存在光栅结构,当满足相位匹配条件时,被激发包层模的有效折射率一定要小于纤芯基模,另外,由于单模光纤中包层模式非常多,因此,低阶包层模都处于远截止区,所以,折射率传感灵敏度要小于包层模谐振光纤。

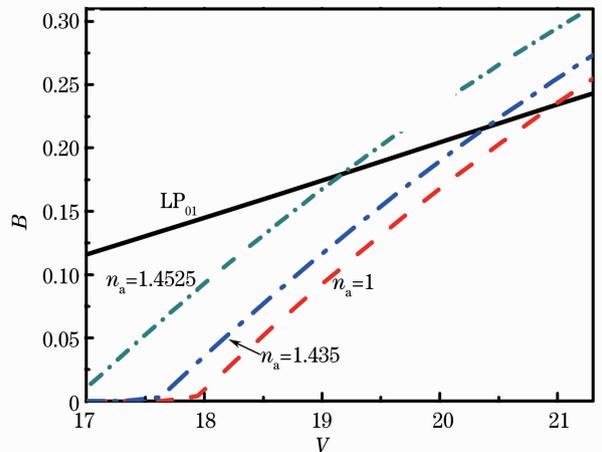


图 9 包层模 HE₁₅ 色散曲线随外界折射率变化的移动情况

Fig. 9 Shift of the cladding mode HE₁₅ dispersion curve with different external refractive indexes

4.3 包层模谐振特种光纤温度和溶液折射率双参量传感特性

双参量及多参量光纤传感技术是当前的研究热点,具有广泛的应用价值,如温度和溶液折射率双参量传感器、温度和应力双参量传感器等。基于这种传感技术,一方面,可以更加精确地测定折射率、应力等参量以消除环境温度变化的影响,另一方面,可以同时获得温度的变化信息。

根据包层模谐振特种光纤光谱特性,设计了如

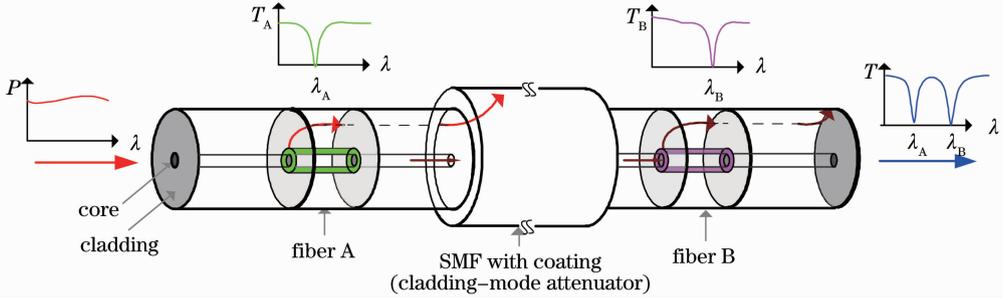


图 10 级联包层模谐振光纤传感器示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the in-series cladding mode resonant specific fiber sensor

图 11 为该双参量传感器所测试的传输光谱。其中虚线和点划线分别表示掺氟包层模和掺硼包层模光纤单独的传输光谱,即未级联之前“单模-包层模-单模”的传输光谱,实线表示级联后的传输光谱。可以看出,虽然第一段包层模光纤具有较高的隔离度,但是在非谐振波长处,仍然有一定的光波能量耦合到包层模中,这将直接影响到第二段包层模谐振光纤的谐振光谱特性。为此,在两段包层模光纤中间设计了包层模滤波结构,即保留一段具有涂覆层的单模光纤,由于涂覆层具有较高的折射率,因此,能够将大部分包层模能量泄露掉,从而大大降低两

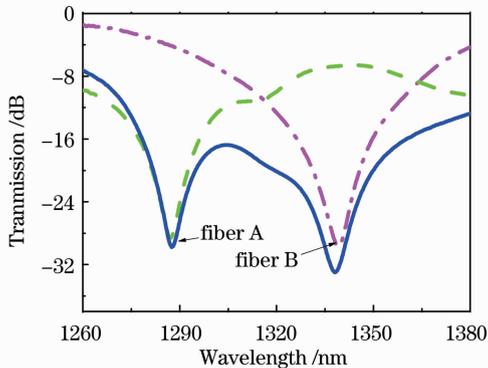


图 11 级联前(虚线和点划线)和级联后(实线)包层模谐振光谱

Fig. 11 Resonant spectra of the two fibers before (dash line and dash dot line) and after (solid line) cascaded

图 10 所示的级联包层模光纤双参量传感器^[16]。其工作原理为,在标准单模光纤(SMF)中级联两段不同结构的包层模光纤,他们的谐振光谱在不同波段,当宽带光源输入该传感器时,在输出端将出现两个包层模谐振光谱。由于采用掺硼和掺氟的包层模谐振光纤级联,两个谐振光谱对温度和外界溶液折射率的变化均具有不同的灵敏度,通过一定的反演算法,就可以通过检测两谐振光谱的移动量来实现双参量传感器。

段包层模光纤的相互干扰。当外界折射率和温度同时发生变化时,两个谐振光谱将发生移动,变化关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{n,A} & K_{T,A} \\ K_{n,B} & K_{T,B} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{res,A} \\ \Delta \lambda_{res,B} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $K_{n,A}, K_{n,B}, K_{T,A}, K_{T,B}$ 分别为灵敏度系数,可以通过对传感器进行实验标定而获得。本项目设计了如图 12 所示的传感器标定系统,将传感头的两段包层模光纤平行放置,并坠以几克重物。采取这种结构的目的在于,一方面保持光纤竖直,消除弯曲的影响,另一方面,中间弯曲的单模光纤可以更进一步滤除包层模,消除两段包层模光纤的相互影响。

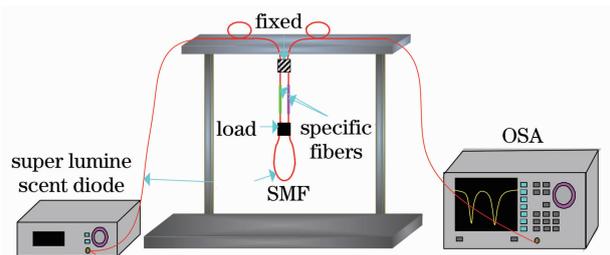


图 12 传感器标定系统装置

Fig. 12 Experimental setup for characterizing sensing properties of the in-series sensor

为了对灵敏度矩阵的 4 个系数进行标定,进行了如下两组测试:1)保持溶液温度不变,改变溶液折射率,得到如图 13(a)所示的光谱响应特性;2)在空气

中,改变环境温度,得到如图 13(b)所示的光谱响应特性。通过数据处理,分别得到两个实验所得到的谐振波长响应特性,如图 14 所示。对于折射率传感特性,掺硼光纤的灵敏度略高于掺氟光纤,灵敏度分别为 153.154 和 93.522 nm/RIU;对于温度传感特性,掺硼光纤的灵敏度则远高于掺氟光纤,灵敏度分别为 0.145和 0.013 nm/℃。而且,他们均呈现出非常好的线性响应特性,从而可以计算得到双参量传感灵敏度

矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{11.5697} \begin{bmatrix} 0.145 & -0.013 \\ -153.154 & 93.522 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{res,A}} \\ \Delta\lambda_{\text{res,B}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在实际应用中,只要通过该传感器读出两个谐振光谱的波长移动情况,就可以通过(2)式计算得到溶液折射率和温度的变化情况,从而实现双参量传感器。

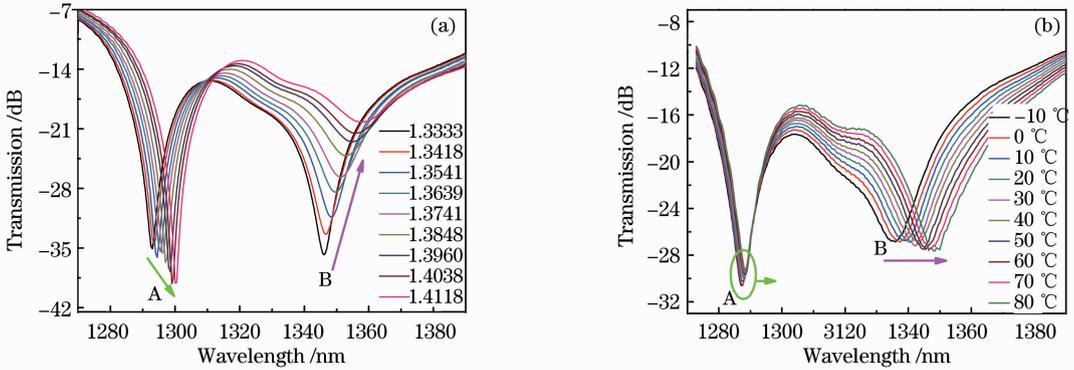


图 13 传感器光谱的溶液折射率(a)和温度(b)响应特性

Fig. 13 Response of spectra (a) external solution refractive index and (b) temperature

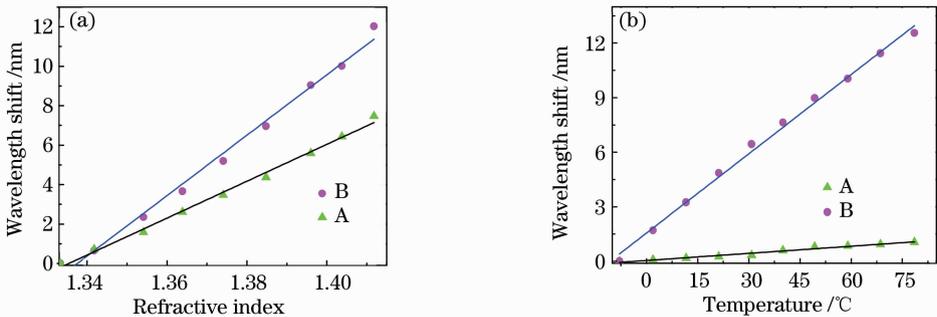


图 14 谐振波长的溶液折射率(a)和温度(b)响应特性

Fig. 14 Response of the resonant wavelengths to (a) external solution refractive index and (b) temperature

5 结 论

基于双包层结构,提出了一种具有包层模谐振激发特性的特种光纤。通过对包层模光纤进行等效,可以利用耦合模理论进行分析。由光纤波导色散曲线模拟结果可得,只有在特定波长处可以实现包层模的激发,其传输光谱呈现阻带滤波特性。利用包层模谐振光纤的光谱传输特性,设计并制备了“单模-包层模-单模”结构的传感头,并对其弯曲、溶液折射率、折射率/温度双参量传感特性进行了研究。实验结果表明,包层模谐振特种光纤对弯曲和溶液折射率具有较高的敏感性;而对于温度参量,可以通过光纤制备工艺,调节内包层掺杂材料实现谐振光谱温度敏感性的调控。其中掺硼光纤的温度敏

感性较掺氟光纤的高 1 个数量级。因此,包层模谐振光纤通过掺杂源的控制,可以对其传感特性进行灵活的控制,这对于研究智能光纤传感器具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 M. Harumoto, M. Shigebara, H. Suganuma. Gain-flattening filter using long-period fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(6): 1027~1033
- 2 K. S. Chiang. Development of long-period fiber grating coupling devices[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(25): F61~F67
- 3 S. Z. Yin, K. W. Chung, X. Zhu. A highly sensitive long period grating based tunable filter using a unique double-cladding layer structure[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **188**(5-6): 301~305
- 4 S. W. James, R. P. Tatam. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application [J]. *Meas. Sci.*

- Technol., 2003, **14**(5): R49~R61
- 5 P. Pilla, V. Malachovská, A. Borriello *et al.*. Transition mode long period grating biosensor with functional multilayer coatings [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(2): 512~526
 - 6 Y. P. Wang, L. M. Xiao, D. N. Wang *et al.*. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(23): 3414~3416
 - 7 J. M. Fini, M. D. Mermelstein, M. F. Yan *et al.*. Distributed suppression of stimulated Raman scattering in an Yb-doped filter-fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2550~2552
 - 8 C. He, X. L. Zeng, F. F. Pang *et al.*. Switchable multi-wavelength fiber laser using in-fiber Mach-Zehnder interferometer [C]. Shanghai: Opto-Electronics and Communication Conference, 2010, 358~359
 - 9 B. Zhou, A. P. Zhang, S. L. He *et al.*. Cladding-mode-recoupling-based tilted fiber Bragg grating sensor with a core-diameter-mismatched fiber section[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, **2**(2): 152~157
 - 10 Z. B. Tian, M. Nix, S. S. H. Yam. Laser beam shaping using a single-mode fiber abrupt taper[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 229~231
 - 11 L. V. Nguyen, D. S. Hwang, S. B. Moon *et al.*. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11369~11375
 - 12 H. Y. Choi, M. J. Kim, B. H. Lee. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5711~5720
 - 13 Z. b. Tian, S. S. H. Yam, H. P. Loock. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(16): 1387~1389
 - 14 F. F. Pang, H. H. Liu, N. Chen *et al.*. Cladding-mode resonance of a double-cladding fiber at a near modal cut-off wavelength for RI sensing[J]. *Measure. Sci. and Technol.*, 2010, **21**(9): 094028
 - 15 F. F. Pang, W. C. Xiang, H. R. Guo *et al.*. Special optical fiber for temperature sensing based on cladding-mode resonance [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12967~12972
 - 16 H. H. Liu, F. F. Pang, H. R. Guo *et al.*. In-series double cladding fibers for simultaneous refractive index and temperature measurement[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 13072~13082
 - 17 F. F. Pang, W. B. Liang, W. C. Xiang *et al.*. Temperature-insensitivity bending sensor based on cladding-mode resonance of special optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(2): 76~78
 - 18 T. Y. Wang, F. F. Pang, X. L. Zeng *et al.*. Cladding mode resonance of special optical fiber for bending sensor with temperature insensitivity[C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 70042M
 - 19 H. H. Liu, F. F. Pang, N. Chen *et al.*. Optical liquid level sensor based on cladding-mode resonance of specialty double-cladding fiber[C]. *SPIE*, 2009, **7634**: 76340M
 - 20 J. Zhang, F. F. Pang, H. R. Guo *et al.*. A strain sensor based on cladding mode resonance of optical double-cladding fiber[C]. *SPIE*, 2010, **7853**: 78533U
 - 21 H. J. Patrick, A. D. Kersey, F. Bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9): 1606~1612